

电磁悬架馈能特性对悬架动力学性能的影响^①

王艳阳^② 李以农^③ 裴金顺 卢少波

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘 要 分析了电磁悬架相关参数对车辆馈能特性的影响。明确了馈能悬架与相关参数之间的关系、悬架的馈能特性与其动力学之间的关系以及馈能悬架的馈能潜力。研究表明:悬架的馈能特性仅与轮胎刚度、悬架无场阻尼、悬架可控阻尼、车速和路面有关。对轮胎刚度、悬架可控阻尼、车速和路面而言,悬架的馈能特性与其舒适性和安全性相矛盾;对悬架无场阻尼而言,悬架的馈能特性与其舒适性保持一致,而与安全性相矛盾。

关键词 主动悬架,能量转换,馈能,车辆综合控制,悬架动力学特性

0 引 言

车辆行驶时,车轴与簧载质量之间的振动能量在传统阻尼作用下以热能的形式耗散,这种热能的耗散会影响器件的工作性能和使用寿命,另一方面,在能源短缺的环境下这种能量耗散也是一种浪费。因此,为了回收车轴与簧载质量间的振动能量,馈能型悬架的研究应运而生^[1-3]。电磁主动悬架作为一种高效的馈能型悬架与被动悬架、半主动悬架和液气压主动悬架相比具有作动频率宽、控制精度高和能量可回收等优点,得到了国内外学者的关注^[3-11]。Goldner 等^[2]对电磁悬架的馈能能力进行了一些基础研究和评估,研究指出,对于 2500lb 的车辆,以 45km/h 的速度行驶在普通高速路上,4 支减振器可产生大约 7500W 的电能;Abouelnour 等^[3]对基于 1/4 车辆模型的电磁悬架的能量回收进行了研究,研究表明车辆以 56km/h 的速度行驶时,一支减振器可以产生大约 150W 的能量。Lei 等^[4]设计并测试了一款车用电磁减振器,测试结果表明在悬架簧载质量和非簧载质量相对速度均方根值为 0.25 ~ 0.5m/s 的情况下,一支电磁减振器可反馈 16 ~ 64W 的能量。日本学者 Suda^[5]研究了一种自供能主动电磁悬架系统。该系统把悬架动力学性能和电磁悬架的自供能特性进行了折中,在车辆动力学性能略

做牺牲的前提下,实现了电磁悬架能量需求和反馈的平衡。喻凡等^[6]分析了电磁悬架电机常数对悬架动力学性能和馈能效果的影响,研究表明,当电机常数取 144N/A 时,馈能悬架可产生大约 165.37W 的能量,在保证电磁悬架馈能效果的同时,显著改善了其动力学性能。文献[7-9]针对电磁悬架系统设计了二次型调节控制器,在提高车辆乘坐舒适性和降低轮胎动载荷的同时,分析了电磁悬架无场阻尼值对其馈能特性的影响。David^[10]提出了一种基于电磁悬架的车辆动力学性能和节能性能的双目标控制结构,根据不同的控制目标确定电磁悬架的工作模式:主动模式、被动模式和半主动模式,以期实现车辆安全性、舒适性和悬架节能性的平衡。喻凡^[11]对近年来馈能型车辆主动悬架的发展和研究进行了全面回顾和总结,重点分析了馈能式电磁悬架的核心问题,指出协调安全性、舒适性和馈能特性是安装馈能式悬架车辆控制的核心问题之一。

为进一步研究车辆节能性、安全性和舒适性的综合控制,需要明确下面 4 个问题:(1)馈能悬架的馈能潜力有多少?(2)悬架馈能特性与车速和路面存在怎样的关系?(3)悬架馈能特性对哪些参数比较敏感?(4)在提高悬架馈能特性的同时,悬架动力学性能会发生怎样的变化?为解决上述 4 个基本问题,本文分析了电磁悬架相关参数包括轮胎刚度、悬架无场阻尼、悬架可控阻尼、车速以及路面不平度

① 国家自然科学基金(51275541)和国家重点实验室自主项目(SKLMT-ZZKT-2012 ZD 06)资助。

② 女,1980 年生,博士生;研究方向:车辆电磁悬架系统研究。

③ 通讯作者,E-mail:ynli@cqu.edu.cn

(收稿日期:2012-10-23)

等对悬架馈能特性的影响,明确了悬架的馈能潜力,得出悬架馈能特性与悬架动力学性能之间的关系,为车辆的节能性、安全性和舒适性的综合控制提供了理论基础。

1 馈能式电磁悬架模型

1.1 1/4 悬架模型

图1为1/4馈能式电磁悬架模型。其中虚线框内为电磁减振器的等效电路。 L 、 AC 和 R_{coil} 分别为电磁减振器的等效电感、等效电源和等效电阻。当路面激励传递给非簧载质量时,簧载质量和非簧载质量之间发生相对运动。电磁悬架将这部分振动转变为线圈与磁场间的相对运动。根据法拉利定律,闭合线圈中的磁场强度发生变化,线圈内将产生感应电压 U_0 和电磁反力 F_{em} 。

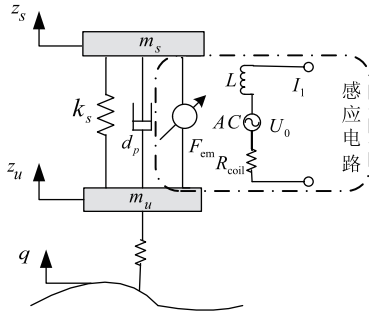


图1 1/4 馈能式电磁悬架模型

根据牛顿定律,可得二自由度馈能式悬架系统的运动微分方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s = -d_p(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_s(z_s - z_u) + F_{\text{em}} \\ m_u \ddot{z}_u = d_p(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - q) - F_{\text{em}} \end{cases} \quad (1)$$

其中 m_s 为簧载质量, m_u 为非簧载质量, z_s 为簧载质量位移, z_u 为非簧载质量位移, q 为路面位移激励, k_s 为悬架弹簧等效刚度, k_t 为轮胎等效刚度, d_p 为电磁减振器等效无场阻尼。 F_{em} 为电磁悬架作动力,其表达式为

$$F_{\text{em}} = KI_1 \quad (2)$$

其中 K 为电磁减振器常数, I_1 为电磁减振器电流。

1.2 馈能电路模型

图2为电磁减振器作为发电机的馈能电路的模型。电磁悬架产生的感应电压 U_0 为

$$U_0 = K\dot{x} \quad (3)$$

其中 $\dot{x}$ 为簧载质量与非簧载质量相对速度,其表示式为

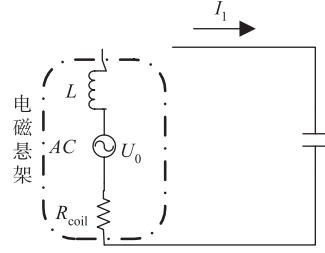


图2 等效馈能电路

$$\dot{x} = \dot{z}_s - \dot{z}_u \quad (4)$$

根据基尔霍夫定律可得

$$U_0 = LI_1 + R_{\text{coil}}I_1 \quad (5)$$

由于电磁减振器的电感相对较小,因此在本电路中忽略电感对馈能电路的影响。

由式(2)、式(3)和式(5)可得

$$F_{\text{em}} = \frac{K^2}{R_{\text{coil}}} \dot{x} \quad (6)$$

则馈能悬架等效可控阻尼为

$$C_{\text{em}} = \frac{K^2}{R_{\text{coil}}} \quad (7)$$

电磁悬架所能反馈的最大功率为

$$P = C_{\text{em}} \dot{x}^2 \quad (8)$$

2 馈能式电磁悬架性能指标

馈能式悬架特性主要包括两个方面:馈能特性和动力学特性。其中悬架动力学特性又包括乘坐舒适性和行驶安全性。其评价指标分别取簧载质量加速度均方根值、轮胎相对动载荷均方根值和馈能悬架平均馈能功率^[6-10]。由式(1)可得电磁悬架系统的频率响应函数为

$$\begin{cases} [m_s(i\omega)^2 + (c_p + c_{\text{em}})(i\omega) + k_s]z_s \\ = [(c_p + c_{\text{em}})(i\omega) + k_s]z_u \\ [m_u(i\omega)^2 + (c_p + c_{\text{em}})(i\omega) + k_s + k_t]z_u \\ = [(c_p + c_{\text{em}})(i\omega) + k_s]z_s + k_t q \end{cases} \quad (9)$$

由式(4)和式(9)可得 $\dot{q}$ 对 $\dot{x}$ 的传递函数为

$$\begin{aligned} \dot{x}/\dot{q} = & \frac{m_u}{k_t} [B_0 + (i\omega)B_1 + (i\omega)^2B_2 + (i\omega)^3B_3 \\ & + (i\omega)^4B_4] [A_0 + (i\omega)A_1 + (i\omega)^2A_2 \\ & + (i\omega)^3A_3 + (i\omega)^4A_4]^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $A_0 = (m_u k_s)/(m_s k_t)$, $A_1 = \frac{c_p + c_{\text{em}}}{m_s} \sqrt{\frac{m_u}{k_t}}$, $A_2 = (1 + \frac{m_u}{m_s}) \frac{k_s}{k_t} + 1$, $A_3 = \frac{c_p + c_{\text{em}}}{m_s} \sqrt{\frac{m_u}{k_t}} (1 + \frac{m_u}{m_s})$, $A_4 = 1$, $B_0 = B_1 = B_3 = 0$, $B_2 = 1$ 。

悬架簧上质量与簧下质量相对速度均值为

$$\sigma^2(\dot{x}) = \frac{1}{2\pi} G_q(f) \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{x}/\dot{q}|^2 d\omega \quad (11)$$

其中 $G_q(f)$ 为时间频率下的路面速度功率谱密度。 $G_q(f)$ 可表示为

$$G_q(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0 V \quad (12)$$

其中 V 为车速; f 为时间频率; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}$; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数。

由式(8)、式(10)和式(11)可得悬架馈能功率均值为

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{2\pi} \frac{m_u^2}{k_t^2} G_q(f) c_{\text{em}} \int_{-\infty}^{+\infty} D^2 d\omega \quad (13)$$

其中 $D = [B_0 + (i\omega)B_1 + (i\omega)^2B_2 + (i\omega)^3B_3 + (i\omega)^4B_4][A_0 + (i\omega)A_1 + (i\omega)^2A_2 + (i\omega)^3A_3 + (i\omega)^4A_4]^{-1}$

据文献[12]有

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} |D|^2 d\omega = \pi([A_0B_3^2(A_0A_3 - A_1A_2) + A_0A_1A_4(2B_1B_3 - B_2^2) - A_0A_3A_4(B_1^2A_3 - A_1A_2) + A_0A_1A_4(2B_1B_3 - B_2^2)]^{-1}) \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)可得悬架馈能特性的评价指标平均馈能功率为

$$P_{\text{ave}} = \frac{k_t c_{\text{em}}}{2(c_p + c_{\text{em}})} G_q(f) \quad (15)$$

由式(12)和式(15)可知, 馈能悬架的馈能潜力仅与悬架无场阻尼、悬架可控阻尼、轮胎刚度、路面不平度和车速等参数有关。

采用与计算平均馈能功率相同的方法, 可得簧载质量加速度均方根值和轮胎相对动载荷均方根值。其中簧载质量加速度均方根值的表达式为

$$\sigma(\ddot{z}_s) = \left[\frac{1}{2\pi} G_q(f) \int_{-\infty}^{+\infty} |D|^2 d\omega \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{2m_s^2} G_q(f) k_t (c_p + c_{\text{em}}) + \frac{k_s^2 (m_s + m_u)}{c_p + c_{\text{em}}} \right]^{1/2} \quad (16)$$

轮胎相对动载荷均方根值表达式为

$$\sigma(F_d/G) = \frac{k_t}{(m_s + m_u)g} \left[\frac{1}{2\pi} G_q(f) \int_{-\infty}^{+\infty} |D|^2 d\omega \right]^{1/2} = \frac{\sqrt{k_t}}{(m_s + m_u)g} \left(\frac{1}{2} G_q(f) (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \right)^{1/2} \quad (17)$$

其中 $R_1 = \frac{(2m_s + m_u)(c_p + c_{\text{em}})m_u}{m_s^2}$,

$$R_2 = \frac{k_s^2 (m_s + m_u)^3}{m_s^2 k_t (c_p + c_{\text{em}})}, R_3 = -\frac{2k_s m_u^2}{m_s (c_p + c_{\text{em}})}, R_4 = \frac{m_u (k_t - 2k_s)}{c_p + c_{\text{em}}} + 1。$$

3 仿真及结果分析

为了进一步研究电磁悬架馈能特性对其动力学性能的影响, 设计了 1/4 馈能式电磁悬架系统, 如图 3 所示。在不同的轮胎刚度、悬架无场阻尼、悬架等效可控阻尼、车速和路面等参数下, 悬架的性能指标 $\sigma(\ddot{z})$ 、 $\sigma(F_d/G)$ 和 P_{ave} 产生相应的变化。表 1 为某中型轿车馈能式悬架参数。仿真车速为 80km/h。



图 3 车辆性能框图

表 1 馈能式车辆模型参数

名称	符号	单位	名义值
簧载质量	m_s	kg	250
非簧载质量	m_u	kg	40
悬架刚度	k_s	N/m	19600
轮胎刚度	k_t	N/m	309511
悬架等效阻尼	d_p	N·s/m	1600
电机常数	K	N/A	115
电容	C	F	10

图 4 为悬架相关参数对悬架性能的影响。图中实线和正三角号分别表示 P_{ave} 的理论值和仿真值, 单位为 W, 由左纵坐标表示; 图中折线和星号分别表示 $\sigma(\ddot{z})$ 的理论值和仿真值, 单位为 cm/s^2 , 由左纵坐标表示; 图中虚线和倒三角号分别表示 $\sigma(F_d/G)$ 的理论值和仿真值, 取百分比, 由右纵坐标表示。图 4(a) 为轮胎刚度对悬架特性的影响。由图 4(a) 可见, P_{ave} 随 k_t 的增加呈线性增加, 其最大值约为 500W; 同时 $\sigma(\ddot{z})$ 、 $\sigma(F_d/G)$ 也有明显的增加。这表明随着轮胎刚度的增加, 悬架的馈能特性有所提高, 而乘坐舒适性和安全性有明显的降低。因此对轮胎刚度而言, 悬架的馈能特性与其动力学特性相矛盾。

图 4(b) 为悬架无场阻尼对悬架特性的影响。由图 4(b) 可见, 随着 d_p 的增加, P_{ave} 明显降低, 其最

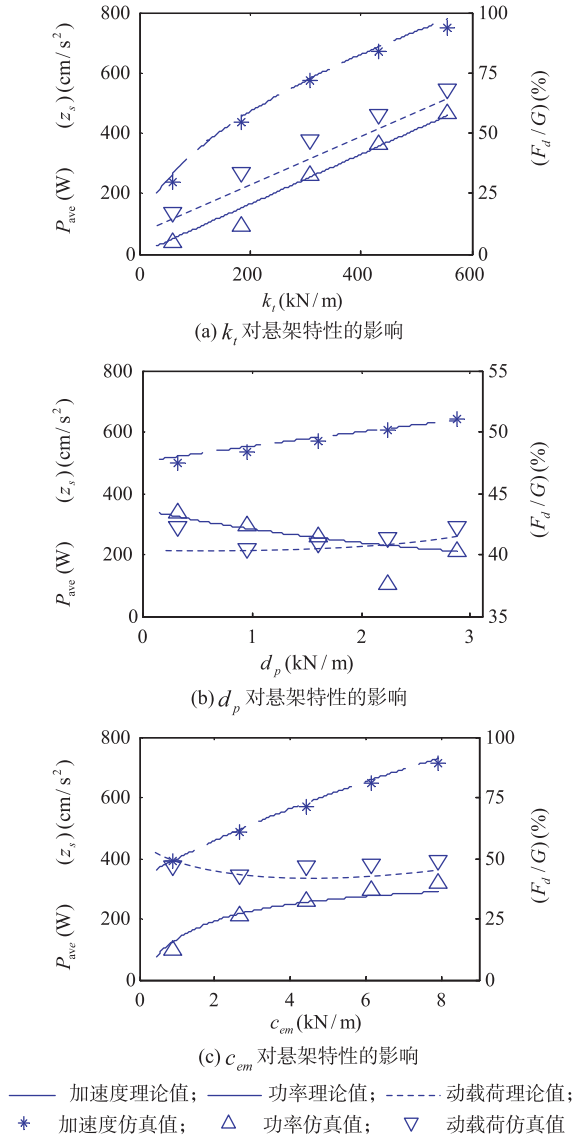


图4 参数对馈能悬架性能的影响

大馈能量约为 350W;同时 $\sigma(\ddot{z})$ 有明显的增加,而 $\sigma(F_d/G)$ 先降低后增加。这表明随着悬架无场阻尼的增加,悬架的馈能特性大幅度降低;同时悬架的舒适性降低,而安全性先提高后降低。因此对悬架无场阻尼而言,悬架的馈能特性与安全性存在矛盾;但与舒适性的变化趋势保持一致。

图4(c)为悬架可控阻尼对悬架特性的影响。随着 C_{em} 的增加, P_{ave} 明显升高,其最大馈能量约为 320W;同时 $\sigma(\ddot{z})$ 有明显的增加,而 $\sigma(F_d/G)$ 先降低后增加。这表明随着悬架可控阻尼的增加,悬架的馈能特性提高;同时车辆的舒适性降低,安全性先提高后降低。因此对悬架可控阻尼而言,悬架的馈能特性与动力学性能相矛盾。

图5为在B、C级路面下,车速对悬架性能的影响。

其中虚线和星号为B级路面下,悬架性能的理论值和仿真值;实线和倒三角号为C级路面下悬架性能的理论值和仿真值。由图5可见在不同路面下,随着车速的提高, P_{ave} 线性增加,其最大馈能量约为 340W;同时 $\sigma(\ddot{z})$ 和 $\sigma(F_d/G)$ 也有明显增加。这表明随着车速的提高,悬架的馈能特性提高,而悬架动力学性能降低。另一方面,随着路面条件的变差,在悬架馈能特性提高的同时,悬架的动力学性能也有明显的降低。因此,对车速和路面条件而言,悬架的馈能特性与其动力学特性相矛盾。

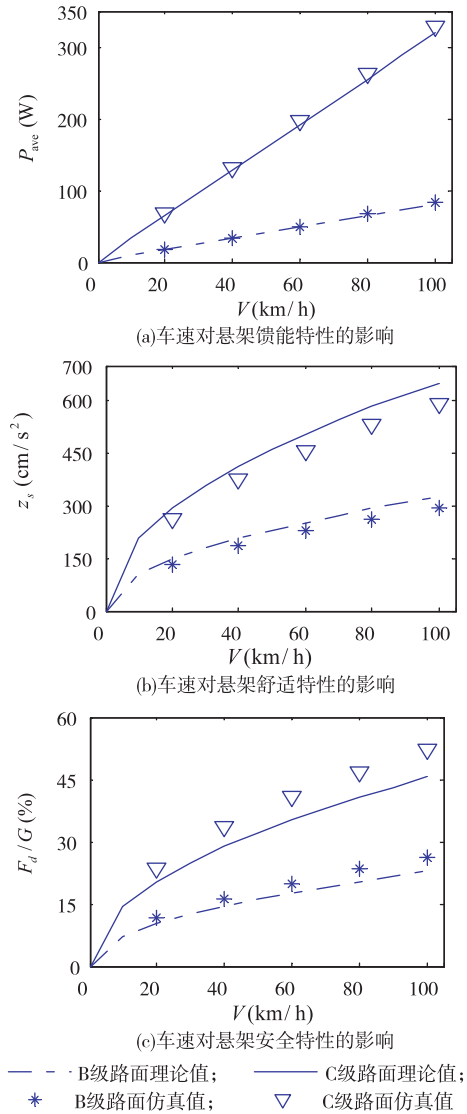


图5 车速对馈能悬架参数的影响

4 结论

(1) 悬架的馈能特性仅与轮胎刚度、悬架无场

阻尼、悬架可控阻尼、车速和路面有关。因此,在以提高悬架馈能特性为目的的减振器及其控制器的设计中,可以根据不同的路面,控制悬架无场阻尼、悬架等效可控阻尼、车速等参数。

(2)对轮胎刚度、悬架可控阻尼、车速和路面而言,悬架馈能特性的提高,会导致悬架动力学性能降低,悬架的馈能特性与其动力性特性相矛盾。对悬架无场阻尼而言,悬架馈能特性提高,会导致悬架的舒适性提高,而安全性先降低后提高,悬架的馈能特性与舒适性的变化趋势相一致,而与安全性相矛盾。因此在悬架馈能特性和车辆动力学性能的综合控制中,根据不同工况实行多目标、分时控制是比较可行的控制方法。

(3)在车辆正常行驶工况下,中型轿车馈能式悬架所反馈的最大能量约为 500W。

参考文献

- [1] 于长森,王伟华,王庆年. 馈能悬架阻尼特性及其影响因素. 吉林大学学报(工学版),2010,40(6):1482-1486
- [2] Goldner R,Zerigian P. A preliminary study of energy recovery in vehicles by using regenerative magnetic shock absorbers. SAE International Technical Paper, 2001, Government/Industry Meeting, DOI: 10. 4271. 2001-01-2071
- [3] Abouelnour A, Hammad H. Electric utilization of vehicle

- damper dissipated energy. *Electronics research institute*, 2003,3(10):598-610
- [4] Lei Z,Scully B. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions. *Smart Materials and Structures*,2010,19:453-463
- [5] Nakano K,Suda Y. Self-powered active vibration control using a single electric actuator. *Journal of sound and vibration*,2003,260:213-235
- [6] 黄昆,张勇超,喻凡. 电动式主动馈能悬架综合性能的协调性优化. 上海交通大学学报,2009,43(2):226-230
- [7] Bart L J,Tom P J,Sande V D. Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension. *Transactions on vehicular technology*,2011,60(4):1384-1393
- [8] Bart L J. Control of an automotive electromagnetic suspension system:[Master dissertation]. Eindhoven:Eindhoven university,2011. 22-38
- [9] Bart L J,Paulides A. Active electromagnetic suspension system for improved vehicle dynamics. *Transactions on vehicular technology*, 2010,59(3):1156-1163
- [10] David S,Bobrovsky B. Actively controlled vehicle suspension with energy regeneration capabilities. *Vehicle system and dynamics*,2011,49(6):833-854
- [11] 喻凡,张勇超. 馈能型车辆主动悬架技术. 农业机械学报,2010,1(41):498-504
- [12] Gradshteyn I S. Table of Integrals, Series, and Products. London:Elsevier Academic Press,1994. 908-1032

The effect of energy regenerative characteristic on dynamics performance of vehicle electromagnetic suspension

Wang Yanyang, Li Yinong, Pei Jinshun, Lu Shaobo

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract

The relationship between the energy regenerative characteristics and the relevant parameters of vehicle electromagnetic suspension is analyzed. The effect of energy regenerative characteristics of vehicle electromagnetic suspension upon the vehicle dynamics performance is discussed. An important analysis result is that the energy regenerative power of electromagnetic suspension is in direct relation to the parameters of roughness coefficient, vehicle speed, tire stiffness and suspension damping. In the aspect of the tire stiffness, suspension controllable damper, velocity and road roughness coefficient, the energy regenerative capability is conflict with the dynamics performance of vehicles. In the aspect of the suspension mechanical damper, the energy regenerative capability is conflict with the safety of vehicles, but it consistent with the ride comfort of vehicles.

Key words: active suspension systems, energy conversion, energy regeneration, vehicle integrated control, suspension dynamic characteristic